DOI: 10.3901/JME.2019.18.053

基于 Gissmo 失效模型的 6016 铝合金板材 断裂行为研究及应用*

梁 宾¹ 赵 岩¹ 赵清江¹ 范体强¹ 李 阳²

(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司 重庆 401122;

2. 重庆凯瑞特种车有限公司 重庆 401122)

摘要: 准确预测金属板材在成形过程中的失效行为是当前面临的挑战。许多试验表明, 金属材料的断裂失效行为伴随着强烈的应变路径依赖性。Gissmo 失效模型采用非线性方式计算损伤积累, 考虑材料的应力状态对断裂失效应变临界值的影响, 适用于预测金属材料在不同应力状态下的断裂行为。以汽车用 6016 铝合金板材为研究对象, 设计六种反映材料不同应力状态的试样, 通过试验结合有限元仿真对标的方法, 校准 Gissmo 失效模型中的参数。将 Gissmo 失效模型用于预测铝合金板材汽车发动机罩内板在冲压过程的断裂失效问题, 并对数值模型计算结果进行试验验证。结果表明, 与传统成形极限图相比, Gissmo 失效模型的计算结果与试验结果更加吻合, 铝合金汽车发动机罩内板样件均未出现裂纹区域, 表明 Gissmo 失效模型适合用于准确预测 6016 铝合金板材的断裂行为。

关键词: 6016 铝合金板材; 断裂; 应力状态; Gissmo 失效模型

中图分类号: TG146

On the Prediction of Failure in 6016 Aluminum Alloy Sheet by Gissmo Damage Model

LIANG Bin¹ ZHAO Yan¹ ZHAO Qingjiang¹ FAN Tiquang¹ LI Yang²

(1. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122;

2. Chongqing CAERI Special Purpose Vehicle Co., Ltd., Chongqing 401122)

Abstract: The accurate prediction of fracture behavior is a challenge in metal sheets forming analysis. Experimental evidence shows that ductile fracture strongly depends on the stress state and strain path. As a stress state dependent damage model, the Gissmo includes incremental formulation for the description of material instability and localization, and nonlinear calculation of damage accumulation. It could be used to predict the failure of metal material under different load conditions. Six different shaped specimens which reflect different stress state of 6016 aluminum alloy sheets are performed tests. All the experimental processes are reproduced within the finite element simulation to calibrate the Gissmo damage model parameters. The stamping numerical model of hood inner validation results indicates that the Gissmo damage model predicted results is consistent with the experimental results. Moreover, compared with the traditional forming limit diagram, the Gissmo damage model is more suitable to accurately simulate and predict the fracture behavior of 6016 aluminum alloy sheets for several load paths.

Key words: 6016 aluminum alloy sheet; fracture; stress state dependence; Gissmo damage model

0 前言

近年来, 随着能源危机的日益加剧, 汽车轻量化已是节能、环保以及经济发展的要求^[1]。铝合金由于其自身的一系列优良性能, 被当作当前用于制

造汽车零部件的最佳汽车用轻量化材料^[2]。有数据显示, 相对传统钢铁材料而言, 铝制汽车, 可减重 30%~40%; 铝制发动机, 可减重 30%; 铝制散热器, 可减重 20%~40%^[3]。总的来说, 全铝车身的汽车更轻、更省油、更安全、更好驾控、更耐腐蚀性, 是汽车轻量化发展的一大趋势。

冲压成形工艺是生产汽车用铝合金零部件的主要方法之一。在汽车铝合金覆盖件等冲压成形过程

* 重庆市科委资助项目(cstc2015zdcy-ztx60010)。20180903 收到初稿, 20190428 收到修改稿

中, 由于覆盖件形状复杂, 导致容易出现多种成形缺陷, 尤其是拉裂缺陷, 严重影响覆盖件的冲压成形性能和使用寿命, 制约了铝合金板材在汽车上的应用。因此, 对铝合金板材在成形过程中的断裂行为进行研究, 并能准确预测铝合金板材的失效区域显得尤为重要。

目前, 许多学者均采用成形极限图(Forming limit diagram, FLD)或 Johnson-Cook 断裂准则对铝合金板材的断裂行为进行研究^[4-5]。研究指出^[6-7], 铝合金在不同受力状态下断裂时临界应变值不同, 且伴随着强烈的非线性应变路径依赖性; 材料受损伤后, 损伤以非线性的方式进行积累直到裂纹产生。而 FLD 只能用于预测分析铝合金板材在线性应变路径下的失效行为^[8], Johnson-Cook 断裂准则以线性方式计算损伤积累^[4], 均与实际情况不符。Gissmo 失效模型中, 同时考虑了材料在不同受力状态下失效临界应变值的不同、材料的非线性应变路径成形及非线性损伤积累方式, 更适合用于研究铝合金板材的断裂行为^[9]。因此, 本文以车用 6016 铝合金板材为研究对象, 通过多组材料塑性及韧性断裂试验得到铝合金板材的力学性能及断裂性能, 基于试验数据, 采用仿真反推的方法校核 Gissmo 失效模型中的参数, 包括不同受力状态的不稳定性变形曲线及失效曲线、网格尺寸效应曲线。选取 LS_DYNA 中的各向异性材料本构模型, 分别将传统 FLD 及 Gissmo 失效模型用于预测铝合金汽车发动机罩内板在冲压成形过程中的变形及断裂行为, 并对比分析两种断裂准则的裂纹区域预测精度。研究方法及结果能为提高汽车用铝合金构件的失效预测精度提供一定的参考。

1 6016 铝合金板材力学性能试验

1.1 基本力学性能试验

为得到 6016 铝合金板材的基本力学性能, 按照 GB/T228 标准, 分别取与轧制方向呈 0°、45°和 90°的标准拉伸试样进行准静态单轴拉伸试验, 得到屈服强度为 178 MPa, 抗拉强度为 288 MPa, 塑性应变比 r 值分别为 0.714、0.609 和 0.897, 说明 6016 铝合金板材在三个方向上的力学性能存在各向异性。同时, 使用高速拉伸试验机测试铝合金板材在 0.1 s^{-1} 、 1 s^{-1} 、 10 s^{-1} 、 100 s^{-1} 、 500 s^{-1} 应变速率下的力学性能, 得到去除弹性段后, 六种应变速率下 6016 铝合金板材的真应力-真应变曲线如图 1 所示, 图中 0.001 s^{-1} 应变率对应于准静态单轴拉伸。从图中可知, 随着应变速率的增大, 铝合金板材的

屈服强度增大, 相同真应变对应的真应力变大, 说明 6016 铝合金的力学性能对应变速率有一定的敏感性。

图 1 不同应变速率下的真应力-真应变曲线

1.2 韧性断裂试验

金属材料的断裂极限应变依赖于局部应力状态, 有研究指出, 金属材料在不同受力状态下, 韧性断裂失效应变临界值不同^[6]。铝合金板材在成形及使用过程中, 不同位置所受应力状态不同, 可用应力三轴度 η 表征^[10], 如式(1)所示

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_v}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

式中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、第二、第三主应力; σ_m 为静水压力; σ_v 为 Mises 等效应力。

本文设计了四种反应 6016 铝合金板材不同受力状态的试样进行准静态断裂测试, 如图 2 所示。其中, 图 2a 为纯剪切试样, 图 2b 为标准拉伸试样, 图 2c 为 5 mm 半径($R5 \text{ mm}$)缺口拉伸试样, 图 2d 为胀型试样。

图 2 不同受力状态下铝合金板材断裂试验试样

对于纯剪切试样、标准拉伸试样及 $R5 \text{ mm}$ 缺口拉伸试样, 采用标准拉伸试验机进行准静态单向拉伸试验, 拉伸速度为 1 mm/s , 试验过程输出试样动端拉力及位移曲线; 与对于胀型试样, 采用胀型试验机进行试验, 冲头速度为 1 mm/s , 试验过程输出

冲头与铝合金板料的接触力及冲头位移曲线, 各组试验的载荷-位移曲线如图 3 所示。

图 3 各组试验所得的载荷-位移曲线

2 Gissmo 失效模型参数校准

2.1 Gissmo 失效模型简介

Gissmo 失效模型基于 Johnson-Cook 断裂模型发展起来^[11], 模型中考虑了材料从受损、非线性损伤积累到材料断裂失效的过程, 能预测材料在不同受力情况下裂纹的产生和扩展情况, 非常适合于分析金属板材在成形过程中的损伤和失效问题^[9]。

Gissmo 失效模型中, 包含以下准则。

(1) 路径相关断裂准则。

在 Gissmo 断裂准则中, 允许任意路径的裂纹产生^[12], 裂纹的产生与否由损伤因子 D 决定, 如式(2)所示

$$\Delta D = \frac{n}{\varepsilon_f} D^{(1-\frac{1}{n})} \Delta \varepsilon_v \quad (2)$$

式中, n 为损伤积累指数, $\Delta \varepsilon_v$ 为等效塑性应变增量, ε_f 为不同应力状态下材料失效时的等效塑性应变。当损伤因子 $D=1$ 时, 材料失效, 裂纹产生。

(2) 路径相关不稳定性准则。

以标准拉伸试验为例, 材料发生塑性变形后, 继续加载时, 材料先发生颈缩(不稳定性变形), 进而发生断裂失效。不稳定性变形因子 F 由式(3)所得

$$\Delta F = \frac{n}{\varepsilon_{v,loc}} F^{(1-\frac{1}{n})} \Delta \varepsilon_v \quad (3)$$

式中, n 为损伤积累指数, $\Delta \varepsilon_v$ 为等效塑性应变增量, $\varepsilon_{v,loc}$ 为不同应力状态下材料产生不稳定性变形时的等效塑性应变。当不稳定性变形因子 $F=1$ 时, 标志着材料开始发生不稳定性变形。

Gissmo 失效模型采用式(4)对材料真应力进行修正^[11], 当材料发生不稳定性变形后, 真应力逐渐衰减, 材料失效时, 应力衰减为零

$$\sigma^* = \sigma \left[1 - \left(\frac{D - D_c}{1 - D_c} \right)^m \right] \quad D \geq D_c \quad (4)$$

式中, D_c 为 $F=1$ 时对应的损伤因子值, m 为应力衰减指数, 不同的 m 值, 应力衰减幅度不同^[11]。假设材料在某受力状态下失效时等效塑性应变为 0.25, 则不同 m 值对应的真应力衰减曲线如图 4 所示。

2.2 Gissmo 失效模型参数校准

Gissmo 失效模型中, 未知参数包括材料损伤指数 n 、不同受力状态下失效时的等效塑性应变 ε_f 、发生不稳定性变形时的等效塑性应变 $\Delta \varepsilon_{v,loc}$ 以及应力衰减指数 m 。由于现有设备的制约, 在试验过程中

图4 Gissmo 失效模型应力衰减曲线

无法准确测量上述参数值,因此,针对各组试验,基于试验结果中的载荷-位移曲线,可以采用 LS_OPT 中的参数反求法^[11]来得到 Gissmo 失效模型中的各个参数值,参数反求流程如图5所示。

图5 Gissmo 失效模型参数反求流程图

参数反求中,考虑各向异性和应变速率对材料本构模型的影响,铝合金材料模型选用 LS_DYNA 中的*MAT_36 号材料本构模型,输入不同应变速率下的真应力-真应变曲线。为了兼顾计算结果的准确性和计算时间的经济性,选定目标区域网格大小为 0.5 mm^[13]。参数反求结果如图6、7所示,参数反求中载荷-位移曲线的均方误差如表1所示。从图6及表1可知,参数反求结果中,数值模拟与试验的载荷-位移曲线吻合度较高,曲线间的均方误差较小,均小于3%。

表1 参数反求中载荷-位移曲线的均方误差

曲线误差	纯剪切 试验	标准拉伸 试验	R5 mm 缺口 拉伸试验	1 mm/s 冲头速 度胀型试验
均方误差 $r(\%)$	1.04	0.45	1.16	2.03

通过参数反求,得到 Gissmo 失效模型参数如表2所示,对应得到的不稳定性变形曲线及失效曲线

如图8所示。

(a) 纯剪切试验

(b) 标准拉伸试验

(c) R5 mm 缺口拉伸试验

(d) 胀型试验

图6 参数反求载荷-位移曲线对比图

图 7 参数反求断后等效应变图

表 2 Gissmo 失效模型参数值

参数	纯剪切 试验	标准拉伸 试验	R5 mm 缺口 拉伸试验	1 mm/s 冲头速 度胀型试验
η	0	0.333	0.508	0.666
$\varepsilon_{v,loc}$	0.232	0.228	0.256	0.381
ε_f	0.464	0.438	0.684	0.894
n	2.000	2.000	2.000	2.000
m	1.070	1.070	1.070	1.070

2.3 网格尺寸效应的影响

研究指出^[14], 在进行数值模拟分析时, 网格尺寸不同, 计算结果不同。即不同的网格尺寸, 计算得到的 Gissmo 失效模型中材料失效时的等效塑性应变值 ε_f 和应力衰减指数 m 也不同。Gissmo 失效模型通过网格依赖性因子 δ 来考虑网格尺寸效应的

影响。

$$\delta(h) = \frac{\varepsilon_f(h)}{\varepsilon_f(0.5 \text{ mm})} \quad (5)$$

式中, $\varepsilon_f(0.5 \text{ mm})$ 为网格尺寸为 0.5 mm 时的失效等效塑性应变值, $\varepsilon_f(h)$ 为其他网格尺寸下的失效等效塑性应变值。

图 8 Gissmo 失效模型不稳定性曲线及失效曲线

选取标准拉伸试验进行参数反求, 以校准不同网格尺寸下的网格依赖因子 δ 值。目标区域的网格尺寸分别为 0.5 mm、1 mm、2 mm、5 mm 和 10 mm, 如图 9 所示。

图 9 不同网格尺寸的标准拉伸试样模型

通过参数反求, 得到不同网格尺寸下失效时的等效塑性应变 ε_f 、网格依赖性因子 δ 及应力衰减指数 m 如表 3 所示。对应得到的 $m-h$ 曲线和 $\delta-h$ 曲线分别如图 10、11 所示。

表 3 不同网格尺寸下的 ε_f 、 m 、 δ

参数	网格尺寸 h/mm				
	0.5	1	2	5	10
ε_f	0.438	0.346	0.330	0.310	0.290
δ	1.000	0.790	0.753	0.708	0.662
m	1.070	1.553	1.812	3.664	5.073

图10 m - h 曲线 图11 δ - h 曲线

2.4 Gissmo 失效模型验证

为研究通过参数反求得到的 Gissmo 失效模型参数的准确性与适用性, 分别建立拉剪试验、 $R7.5\text{ mm}$ 缺口拉伸试验及胀型试验数值模型, 模型中以 Gissmo 失效模型来预测铝合金板材在三种受力状态下的失效行为, 并进行试验验证, 试验试样如图 12 所示。

图12 Gissmo 失效模型验证试验试样图

数值模拟及试验所得的载荷-位移曲线对比如图 13 所示。从图中可以看出, 采用 Gissmo 失效模型预测铝合金板材在三种不同应力状态下的失效时, 得到的载荷-位移曲线与试验结果曲线变化趋势

相同, 曲线最大值存在少许差异, 曲线间的均方误差如表 4 所示, 从表中可知, 曲线间吻合度较高, 均方误差均小于 10%。

(a) 拉剪试验

(b) $R7.5\text{ mm}$ 缺口拉伸试验

图13 Gissmo 失效模型验证结果图

表4 Gissmo 失效模型验证载荷-位移曲线的均方误差

曲线误差	拉剪试验	$R7.5\text{ mm}$ 缺口 拉伸试验	5 mm/s 冲头速 度胀型试验
均方误差 $r(\%)$	7.55	4.10	8.31

数值模拟与试验中断裂后的形貌对比如图 14 所示。从图可以看出, 两者的断裂形貌具有较高的吻合度。图 13、14 结果表明, 采用参数反求得到的 Gissmo 失效模型参数是准确的, 能较为准确地预测铝合金板材的失效。

图 14 裂纹形貌对比图

3 Gissmo 失效模型的应用

为了进一步研究 Gissmo 失效模型在汽车零部件上应用时的适用性与准确性, 建立汽车发动机罩内板冲压成形数值模型, 分别选用 Gissmo 失效模型与传统 FLD 去预测铝合金板材的失效情况, 并进行对比分析。数值模型如图 15 所示, 发动机罩内板零件冲压模型中, 铝合金板料尺寸为 $1\,610\text{ mm} \times 1\,195\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$ 。凹膜、凸模和压边圈均选择 LS_DYNA 中的 *MAT_20 刚体材料本构模型, 铝合金板材选择 *MAT_36 各向异性材料本构模型。板料与凹膜、凸模及压边圈间设置由试验测试所得平均接触摩擦系数为 $0.1^{[15]}$, 冲压速度为 300 mm/s 。

图 15 发动机罩内板零件冲压模型

3.1 计算结果

3.1.1 受力状态分布

冲压成形后, 铝合金板材不同部位的受力状态如图 16 所示。从图中可看出, 冲压成形过程中, 应力三轴度在 $-0.666 \sim 0.667$ 之间不断变化, 说明铝合金材料受力状态复杂。研究表明, 铝合金在成形过程中通常存在两种断裂方式, 即正拉断和剪断^[12], 对铝合金不同应力状态下断裂问题的研究多不考虑受压失效^[16]。因此, 本文只研究了铝合金板材成形过程中应力三轴度值为正时的失效行为。

图 16 汽车发动机罩内板应力三轴度变化图

3.1.2 塑性应变分布

冲压成形后, 铝合金板材不同部位应变分布如图 17 所示。从图中可知, 随着冲压过程的进行, 板材整体应变逐渐增大, 其中, 形状复杂的区域如内板中间靠前锁扣位置应变较大, 最大应变达到了 0.6 , 如图中椭圆形线框内所示。

图 17 汽车发动机罩内板应变图

3.1.3 Gissmo 失效模型预测裂纹区域

使用 Gissmo 失效模型预测铝合金板材的裂纹区域的计算结果如图 18 所示。在 LS_DYNA 中使用 Gissmo 失效模型预测铝合金板材的失效行为时,若有裂纹产生,能直观看到裂纹形状^[17]。从图中可看出,冲压结束后,铝合金板材上没有出现裂纹形状,即没有裂纹产生。

图 18 Gissmo 失效模型预测失效区域图

3.1.4 FLD 裂纹区域

采用 FLD 预测铝合金板材冲压成形后的裂纹区域如图 19 所示。从图中可以看出,冲压成形后,

(a) 铝合金板材成形性能图

(b) 裂纹区局部放大图

图 19 FLD 预测失效区域图

内板中间靠前锁扣位置有裂纹产生,如图中椭圆形线框内所示,从图 17 可知,此区域在冲压成形过程中应变最大。

3.2 冲压试验验证

针对上述铝合金板材汽车引擎盖内板冲压成形数值模拟结果,开发相应的模具,并进行实际冲压试验,冲压结果如图 20 所示。试验结果显示,在整个冲压过程中,铝合金板材没有产生裂纹,成形性能较好。

图 20 铝合金板材汽车引擎盖内板冲压件

3.3 数值模拟与试验结果对比分析

对比分析实际冲压结果图 20 与 Gissmo 失效模型分析结果图 18 可知,数值模拟计算结果与试验结果中,铝合金板材均没有产生裂纹,吻合度较高;对比 FLD 计算结果与试验结果可知,FLD 计算中,内板中间靠前锁扣位置产生裂纹,而试验过程并未产生裂纹,两者存在差异。因此,和传统 FLD 相比,研究得到的 Gissmo 失效模型能更准确的预测铝合金板材在冲压成形过程中的失效情况。

4 结论

(1) 使用 4 种反映 6016 铝合金板材不同应力状态的试样进行了试验。基于试验结果中的载荷-位移曲线,采用参数反求法校准了 Gissmo 失效模型中的参数。反求结果显示,数值模拟及试验中载荷-位移曲线间的均方误差均小于 3%,四种应力状态下,铝合金失效应变值不同,表明,6016 铝合金板材的失效应变受应力状态的影响。

(2) 使用 Gissmo 失效模型预测了铝合金板材在拉剪、R7.5 mm 缺口拉伸及 5 mm/s 冲头速度胀型试验三种应力状态下的失效情况,并进行了试验验证。结果显示,数值模拟与试验所得载荷-位移曲线间均方误差均小于 10%;裂纹宏观形貌相似,吻合度较高。表明 Gissmo 失效模型能准确预测铝合金板材在多种应力状态下的失效情况。

(3) 建立了发动机罩内板零件冲压模型, 分别使用 FLD 与 Gissmo 失效模型预测 6016 铝合金板材的失效情况, 并进行试验验证。对比分析发现, 采用 FLD 预测铝合金板材发动机罩内板零件冲压成形时在板中间靠锁扣位置处产生裂纹; 而采用 Gissmo 计算铝合金板材发动机罩内板零件冲压成形时没有裂纹产生, 与试验结果相吻合。研究结果表明, Gissmo 失效模型相比 FLD 能更准确地预测 6016 铝合金板材的失效行为。本文研究结果能为提高汽车用铝合金构件的失效预测精度提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 1-23.
LI Yongbing, MA Yunwu, LOU Ming, et al. Advances in welding and joining processes of multi-material lightweight car body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 1-23.
- [2] 金飞翔, 钟志平, 李凤娇, 等. 不同硬化模型对铝合金板冲压成形模拟结果的影响[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 57-66.
JIN Feixiang, ZHONG Zhiping, LI Fengjiao, et al. Influence of different hardening model for the simulating results of the aluminum alloy sheet stamping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 57-66.
- [3] 袁序弟. 汽车用铝前景及铝材需求[J]. 资源再生, 2005(10): 15-17.
YUAN Xudi. Prospects for aluminum for automobiles and demand for aluminum materials[J]. Resources Recycling, 2005(10): 15-17.
- [4] 刘军. 某车用铝合金动态力学性能及其断裂失效行为研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2017.
LIU Jun. A6C16 dynamic mechanical property and fracture failure analysis of aluminum alloy for automobile[D]. Ningbo: Ningbo University, 2017.
- [5] QIAN Lingyun, FANG Gang, ZENG Pan, et al. Experimental and numerical investigations into the ductile fracture during the forming of flat-rolled 5083-O aluminum alloy sheet[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 220: 264-275.
- [6] BASARAN M. Stress state dependent damage modeling with a focus on the lode angle influence[D]. Aachen: Rheinisch-Westf Lischen Technischen Hochschule Aachen, 2011.
- [7] 康永林, 孙英, 王先进. 用新型摩擦装置测定薄板成形的摩擦系数[J]. 机械工程学报, 1996, 32(5): 105-109.
KANG Yonglin, SUN Ying, WANG Xianjin. Determination of friction coefficient of sheet forming by a new friction device[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1996, 32(5): 105-109.
- [8] MATTIASSON K, JERGEUS J, DUBOIS P. On the prediction of failure in metal sheets with special reference to strain path dependence[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 88: 175-191.
- [9] NEUKAMM F, FEUCHT M, BISCHOFF M. On the application of continuum damage models to sheet metal forming simulations[J]. Ibai Publishing, 2008, (4): 616-629.
- [10] 祁爽, 蔡力勋, 包陈, 等. 基于应力三轴度的材料颈缩和破断行为分析[J]. 机械强度, 2015, 182(6): 1152-1158.
QI Shuang, CAI Lixun, BAO Chen, et al. Analysis of necking and breaking behavior of materials based on stress triaxiality[J]. Mechanical Strength, 2015, 182(6): 1152-1158.
- [11] EFFELBERG J, HAUF A, FEUCHT M, et al. On parameter identification for the GISSMO damage model[C]// Proceedings of the 12th International LS-DYNA Users Conference, Dearborn, USA. 2012: 1-10.
- [12] MILLER W S, ZHANG L, BOTTEMA J, et al. Recent development in aluminum alloys for the automotive industry[J]. Materials Science and Engineering, 2000, 280(1): 37-49.
- [13] ANDRADE F, FEUCHT M, HAUF A. On the prediction of material failure in LS-DYNA: A comparison between GISSMO and DIEM[C]// Proceedings of the 13th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, USA. 2014: 1-10.
- [14] 张少雄, 王利永, 孔泉. 网格粗细对于有限元模态分析计算的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(5): 92-94.
ZHANG Shaoxiong, WANG Liyong, KONG Quan. Influence of grid thickness on finite element modal analysis calculation[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(5): 92-94.
- [15] 郭怡晖, 万鑫铭, 赵岩, 等. 基于变摩擦系数的铝合金覆盖件冲压成形模拟[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(5): 39-44.
GUO Yihui, WAN Xinming, ZHAO Yan, et al. Numerical simulation of stamping of aluminum alloy hood inner panel based on variable coefficient of friction[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(5): 39-44.
- [16] 朱浩, 朱亮, 陈剑虹, 等. 不同应力状态下铝合金变形及损伤机理的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007,

36(4): 597-601.

ZHU Hao, ZHU Liang, CHEN Jianhong, et al. Study on deformation and damage mechanism of aluminum alloy under different stress states[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(4): 597-601.

- [17] CHINZEI S, NAITO J. The numerical failure prediction by the damage model GISSMO in various materials of

sheet metal[J]. Computers & Structures, 2015, 80(23): 1771-1788.

作者简介: 梁宾, 男, 1991 年出生。主要研究方向为材料失效模拟、热成型模拟。

E-mail: liangbin@caeri.com.cn

赵岩(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为材料工艺仿真模拟。

E-mail: zhaoyan@caeri.com.cn

(上接第 52 页)

- [23] LIU Po, ZONG Yingying, SHAN Debin, et al. Relationship between constant-load creep, decreasing-load creep and stress relaxation of titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 638: 106-113.

- [24] 湛利华, 王萌, 黄明辉. 基于蠕变公式的时效应力松弛行为预测模型[J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 70-76.
ZHAN Lihua, WANG Meng, HUANG Minghui.

Prediction model for aging stress-relaxation behavior based on creep equations[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10): 70-76.

作者简介: 毕静, 女, 1988 年出生, 工程师。主要研究方向为金属热冲压成形。

E-mail: 475912215@163.com

吴向东(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为塑性成形理论、工艺与装备技术。

E-mail: wuxiangdongbuaa@163.com